

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРЫ НА ВАРИАТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ИОНОСФЕРЕ В ЯНВАРЕ 2009 ГОДА

© 2021 г. М. В. Клименко^{1*}, К. Г. Ратовский², В. В. Клименко¹, Ф. С. Бессараб¹,
Т. В. Суходолов^{1, 3, 4}, Е. В. Розанов^{1, 3, 4}

¹Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, Калининград, Россия

²Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

³Physikalisch-Meteorologisches Observatorium, World Radiation Center, Davos, Switzerland

⁴Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zurich, Zurich, Switzerland

*E-mail: maksim.klimenko@mail.ru

Поступила в редакцию 10.06.2021;

после доработки 05.08.2021;

принята в печать 20.08.2021

Представлены результаты исследования вариативности электронной концентрации в ионосфере в январе 2009 года. Были рассмотрены вариации электронной концентрации в ионосфере над отдельными станциями и глобального электронного содержания по данным наблюдений и результатам модельных расчетов. Сравнение ионосферной вариативности, полученной по результатам расчетов с использованием моделей верхней атмосферы (ГСМ ТИП) и всей атмосферы (EAGLE), показало, что атмосферно-ионосферное взаимодействие может играть одну из ключевых ролей в изменчивости ионосферы на средних широтах. В работе также обсуждается вопрос о воспроизведении по модели EAGLE эффектов стратосферного потепления в 2009 году.

Ключевые слова: атмосфера, ионосфера, модель всей атмосферы, глобальное электронное содержание, нейтральный состав верхней атмосферы, внезапное стратосферное потепление.

DOI: 10.31857/S0207401X21100083

1. ВВЕДЕНИЕ

Пространственное распределение и временные вариации параметров ионосферы Земли оказывают существенное влияние на условия прохождения радиосигналов. Поэтому прогноз и диагностика состояния ионосферы представляют собой чрезвычайно важную научную и технологическую проблему [1], которую необходимо решать для бесперебойной работы систем связи воздушных и морских судов, загоризонтной радиолокации и глобальных навигационных систем. В свою очередь, на ионосферу Земли в разной степени влияют солнечная активность [2–4], магнитосферная изменчивость [5–7], а также процессы в нижележащей атмосфере [8–10]. Сравнительный анализ откликов полного электронного содержания на внезапные стратосферные потепления 2005–2013 гг. [11], произошедшие при разных уровнях солнечной активности, показал, что величина отклика определяется скорее типом потепления (сильное или слабое), чем уровнем солнечной активности. Аналогичные наблюдения [12] показали, что отклики полного электронного содержания на внезапные стратосферные потепления в минимуме и

максимуме солнечной активности сопоставимы друг с другом. Этот результат расходится с результатами модельных расчетов, предсказывающими ослабление отклика с возрастанием солнечной активности. Авторы работы [13] на основании результатов модельных расчетов пришли к выводу о том, что во время стратосферного потепления в январе 2009 г. вклад геомагнитных вариаций в изменения верхней термосферы превышал вклад, обусловленный собственно стратосферным потеплением. В работе [14] на основе численного моделирования был сделан вывод о необходимости учета атмосферных возмущений при анализе ионосферных откликов на геомагнитные бури, а результаты численного моделирования [10, 15] подтверждают, что четырехпиковая долготная вариация и вечерний всплеск восточного электрического поля на экваторе являются следствием атмосферно-ионосферного взаимодействия.

В настоящий момент отсутствует полное понимание относительной роли вкладов солнечной, геомагнитной и атмосферной активности в итоговую ионосферную изменчивость. Так, результаты работы [13] показывают доминирующую

роль относительно небольших геомагнитных вариаций, тогда как в работе [14] показано, что эффекты экстремальной геомагнитной бури и сильного стратосферного потепления играют сопоставимую роль. Согласно многочисленным оценкам, основанным на данных различных наблюдений с использованием различных методов, вклад изменчивости атмосферы в вариативность электронной концентрации в ионосфере составляет 13–15% для дневной среднеширотной ионосферы [16–18]. До сих пор оценки вклада атмосферы в вариативность ионосферы, полученные на основе результатов численных моделей, отсутствуют. Такие исследования должны основываться на результатах численных моделей, включающих все слои атмосферы и ионосферу. В настоящий момент несколько таких моделей созданы и развиваются в США [19–21], Канаде [22], Японии [23], Англии [24] и России [25, 26].

В данной статье рассматривается влияние изменчивости атмосферы на вариативность ионосферы на основе результатов расчетов модели всей атмосферы в период 15–31 января 2009 года. Указанный период выбран по той причине, что в это время практически отсутствовали изменения солнечной активности, а геомагнитная активность оставалась низкой с небольшими вариациями и небольшим возмущением 26 января. Таким образом, цель статьи – решение проблемы оценки вклада атмосферной активности в вариации электронной концентрации в ионосфере.

2. ОПИСАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Модель EAGLE (Entire Atmosphere Global Model) представляет собой объединение модели нижней и средней атмосферы HAMMONIA (Hamburg Model of the Neutral and Ionized Atmosphere) [27] и модели верхней атмосферы ГСМ ТИП (глобальная самосогласованная модель термосферы, ионосферы и протоносферы) [28, 29]. Одной из основных проблем при создании модели EAGLE был выбор схемы согласования в области перекрытия высотных сеток моделей HAMMONIA и ГСМ ТИП. Решение этой проблемы представлено в работах [10, 30]. Для проведения численных экспериментов нами был выбран период с 15 по 31 января 2009 г., который характеризовался низкой солнечной ($F_{10.7} \sim 70$) и геомагнитной (за весь период максимальный $K_p < 4$, а средний $K_p = 1$) активностью. Расчеты были выполнены для этого же периода, включающего внезапное стратосферное потепление. В расчетах использовалась “стандартная” волновая активность в модели HAMMONIA и ассимилировались наблюдаемые распределения ветров и температуры на уровнях давления от 850 до 1 гПа.

Дополнительно нами были проведены расчеты с использованием модели ГСМ ТИП при задании постоянных граничных условий на высоте 80 км. Это позволило выявить различия в описании ионосферной вариативности между моделями EAGLE и ГСМ ТИП и тем самым сделать вывод о вкладе атмосферной изменчивости в ионосферную вариативность. Расчеты по моделям EAGLE и ГСМ ТИП проводились при задании постоянной разности потенциалов через полярные шапки и продольных токов второй зоны без учета изменения солнечной и геомагнитной активности в рассматриваемый период. Следует отметить, что это приближение абсолютно адекватно для периода минимума солнечной и геомагнитной активности в январе 2009 года.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Ниже представлены результаты расчетов по моделям EAGLE и ГСМ ТИП и данные наблюдений ионизондов в Иркутске и Калининграде, а также данные наблюдений за глобальным электронным содержанием (ГЭС) и отношением концентраций $n(O)/n(N_2)$ по данным GUVI. На рис. 1 показаны вариации рассчитанного по модели EAGLE и по данным наблюдений временного хода ГЭС за рассматриваемый период: с 15 по 31 января 2009 г. Максимум температуры стратосферного потепления наблюдался 23 января 2009 г. С этого дня согласно результатам расчетов по модели EAGLE и данным наблюдений начинается рост ГЭС вплоть до 27 января. Следует отметить сходство наблюдавшихся и рассчитанных вариаций ГЭС в период 23–25 января, связанных, по-видимому, с влиянием стратосферного потепления. Также согласно расчетам и данным наблюдений можно отметить, что в период 21–31 января происходит усиление полусуточной вариации ГЭС, что детально обсуждалось в работе [31]. Важно также отметить, что наибольшие различия результатов расчетов и данных наблюдений проявляются в среднем ходе ГЭС день ото дня в период с 15 по 21 января и в суточном ходе ГЭС 26 января во время однодневного усиления геомагнитной активности, эффекты которого не учитывались в представленных результатах, полученных по модели EAGLE.

На рис. 2 показаны временные вариации интегрального отношения O/N_2 на разных широтах, полученные по результатам модельных расчетов и по данным наблюдений. Расчет отношения $n(O)/n(N_2)$ по результатам расчетов модели EAGLE проводился на основе методики расчета, используемой при интерпретации данных GUVI [32]. Общими свойствами $n(O)/n(N_2)$ по результатам расчетов и данным наблюдений являются: отрицательные возмущения $n(O)/n(N_2)$ во время потепления (21–

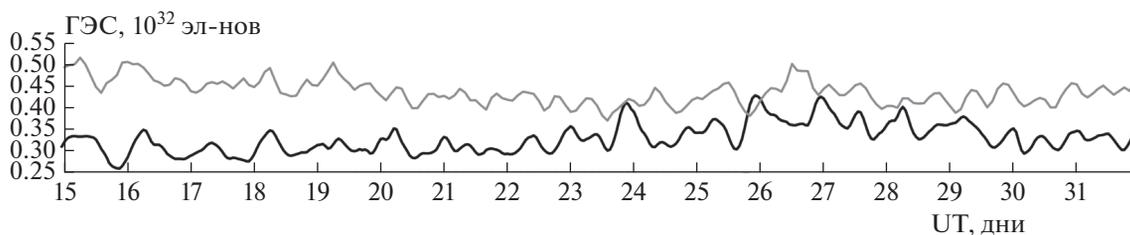


Рис. 1. Вариации ГЭС по результатам расчетов модели EAGLE (черная линия) и по данным наблюдений (серая линия) с 15 по 31 января 2009 г.

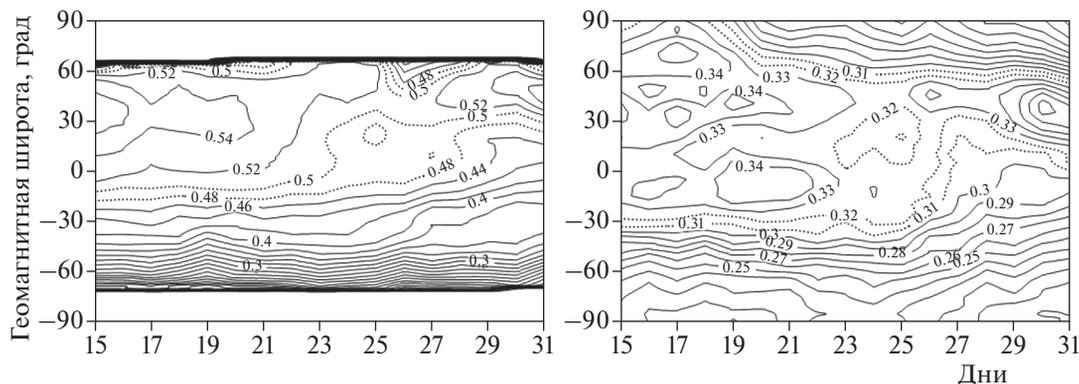


Рис. 2. Вариации дневного широтного распределения $n(\text{O})/n(\text{N}_2)$ по результатам расчетов модели EAGLE (справа) и по данным наблюдений GUVI (слева) с 15 по 31 января 2009 г. На обеих картах точечными изолиниями обозначены пространственно-временные интервалы вблизи локальных минимальных значений $n(\text{O})/n(\text{N}_2)$ на средних и низких широтах.

25 января), которое, согласно [33], и является основной причиной наблюдавшихся отрицательных возмущений f_oF2 на средних широтах [34, 35]; положительные возмущения $n(\text{O})/n(\text{N}_2)$ на средних широтах после потепления (27–31 января), которые отмечались ранее [36]. Таким образом, модель EAGLE успешно воспроизводит многодневные тенденции (квазипериод ~ 20 дней) возмущений электронного содержания и состава нейтральной атмосферы во время и после внезапного стратосферного потепления 2009 года.

Для оценки вариативности ионосферы в период 15–31 января 2009 г. мы рассмотрели отклонения f_oF2 от средних значений за этот период над станциями Иркутск и Калининград для всех моментов мирового времени UT. Абсолютные возмущения f_oF2 представляют собой: $\Delta f_oF2 = f_oF2(\text{Day}, \text{UT}) - f_oF2m(\text{UT})$, где Day – день января, UT – мировое время, а $f_oF2m(\text{UT})$ – усредненное значение f_oF2 за период с 15 по 31 января для данного момента UT. Относительное возмущение f_oF2 представляет собой: $\delta f_oF2(\%) = 100\Delta f_oF2(\text{Day}, \text{UT})/f_oF2m(\text{UT})$. На рис. 3 показано сравнение вариаций относительных возмущений $\delta f_oF2(\%)$ над станциями Иркутск и Калининград, полученных по результатам расчетов с использованием

моделей EAGLE и ГСМ ТИП, а также по данным наблюдений. В модели ГСМ ТИП учитывается только геомагнитная активность, которая в рассматриваемый период была слабой. В результате относительные вариации δf_oF2 , полученные по модели ГСМ ТИП, практически незаметны на фоне δf_oF2 , полученных по данным наблюдений и по модели EAGLE, учитывающей активность нижележащей атмосферы. Отметим, что разброс значений $\delta f_oF2(\%)$ в модели EAGLE близок к наблюдаемому. Правда, это, к сожалению, не означает, что результаты расчетов по модели EAGLE хорошо коррелируют с данными наблюдений. Так, иногда наблюдается корреляция результатов расчетов с данными наблюдений, а иногда – антикорреляция.

Для того чтобы представить результаты качественного сравнения на языке чисел, для станций Калининград и Иркутск были рассчитаны среднеквадратические отклонения $\delta f_oF2(\%)$, полученных по результатам расчетов с использованием моделей ГСМ ТИП и EAGLE, а также по данным наблюдений, которые показаны в табл. 1. Кроме того, нами были получены коэффициенты корреляции по Пирсону для модельных и наблюдаемых $\delta f_oF2(\%)$. Согласно табл. 1, наблюдавши-

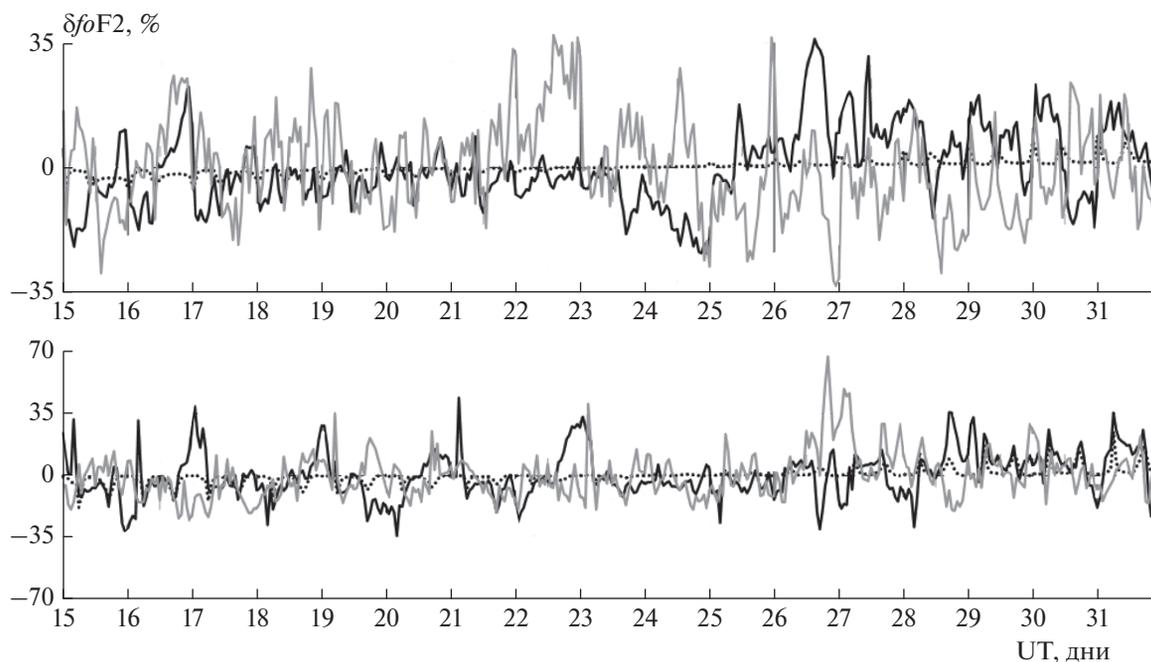


Рис. 3. Временное развитие относительных возмущений $\delta foF2$ относительно усредненных значений над станциями Иркутск (вверху) и Калининград (внизу). Точечной линией показаны значения $\delta foF2$, полученные по результатам расчетов модели ГСМ ТИП, черной сплошной линией – по результатам расчетов модели EAGLE, серой сплошной – по данным наблюдений с 15 по 31 января 2009 г.

еся значения ионосферной вариативности (относительной) для Иркутска и Калининграда близки друг к другу (а вернее, совпадают с точностью до 1%). Модель EAGLE хорошо воспроизводит наблюдавшуюся вариативность, особенно для Иркутска. Напротив, расчет по модели ГСМ ТИП, в которой не учитываются эффекты атмосферной изменчивости, дает на порядок меньшую величину ионосферной вариативности, полученную по данным наблюдений над обеими станциями. Отсюда можно сделать вывод о несомненно важной роли атмосферной изменчивости в формировании ионосферной вариативности. Несмотря на близость значений модельной и наблюдаемой интенсивностей возмущений, коэффициенты корреляции между модельными и наблюдаемыми

вариациями $\delta foF2$ имеют низкие значения (не превышают 22%). Таким образом, вопрос воспроизведения вариаций ионосферных параметров, вызванных действием атмосферно-ионосферного и магнитосферно-ионосферного взаимодействий, остается открытым. Решение данного вопроса может быть основано на использовании данных мультиинструментальных обсерваторий околоземного космического пространства [37] совместно с результатами расчетов, полученными с использованием моделей всей атмосферы [10, 31].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены результаты расчетов с использованием модели всей атмосферы (EAGLE), включающей в себя расчет параметров нижней, средней и верхней атмосферы. Показано, что модель EAGLE успешно воспроизводит многодневные тенденции (квазипериод ~20 дней) возмущений электронного содержания и состава нейтральной атмосферы, а также интенсивность вариативности $foF2$ на средних широтах во время и после внезапного стратосферного потепления 2009 года. В частности, отмечается уменьшение $n(O)/n(N_2)$ на средних широтах во время стратосферного потепления и его увеличение после стратосферного потепления.

Основной вывод статьи заключается в том, что в период внезапных стратосферных потеплений в

Таблица 1. Статистическая характеристика (σ) относительных возмущений $\delta foF2$ (%), представляющая собой среднеквадратичное отклонение $\delta foF2$ (%) относительно средних значений над Иркутском и Калининградом, полученное по данным наблюдений и по результатам расчетов моделей ГСМ ТИП и EAGLE

Данные	σ , %	
	Калининград	Иркутск
EAGLE	13	11
ГСМ ТИП	4	2
Наблюдения	13	13

условиях слабой солнечной и геомагнитной активности основной вклад в ионосферную вариативность вносит атмосферная, а не геомагнитная активность. Таким образом, для воспроизведения интенсивности вариативности f_oF_2 на средних широтах необходимо и достаточно учитывать атмосферно-ионосферное взаимодействие.

Исходные ряды ГЭС получены с использованием системы SIMuRG (<https://simurg.iszf.irk.ru/>). Авторы выражают благодарность Aerospace Corporation и Johns Hopkins University за спутниковые данные GUVI/TIMED. Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Ангара” (<http://ckp-rg.ru/ckp/3056/>).

Работа была выполнена при финансовой поддержке грантом Российского научного фонда № 21-17-00208 и Минобрнауки России в части проведения наблюдений, обработки данных и анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котова Д.С., Оводенко В.Б., Ясюкевич Ю.В. и др. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 7. С. 87; <https://doi.org/10.1134/S0207401X18070129>
2. Фаткуллин М.Н. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы. Т. 4. М.: ВИНТИ, 1978. С. 6.
3. Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V. et al. // Radio Sci. 2005. V. 40. RS5009; <https://doi.org/10.1029/2004RS003179>
4. Клименко М.В., Клименко В.В., Ратовский К.Г. и др. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 5. С. 75; <https://doi.org/10.31857/S0207401X21050058>
5. Vuonsanto M.J. // Space Science Reviews. 1999. V. 88. № 3–4. P. 563; <https://doi.org/10.1023/A:1005107532631>
6. Ратовский К.Г., Клименко М.В., Ясюкевич Ю.В. и др. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 10. С. 57; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20100106>
7. Котова Д.С., Захаренкова И.Е., Клименко М.В. и др. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 4. С. 80; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20040093>
8. Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2000. V. 62. № 8. P. 685. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00029-8)
9. Yiğit E., Koucká Knížová P., Georgieva K. et al. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2016. V. 141. P. 1; <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.02.011>
10. Клименко В.В., Клименко М.В., Бессараб Ф.С. и др. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 7. С. 86; <https://doi.org/10.1134/S0207401X19070070>
11. Laskar F.I., Pallamraju D., Lakshmi T.V. et al. // Earth, Planets and Space. 2014. V. 66. P. 66; <https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-94>
12. Goncharenko L., Chau J.L., Condor P. et al. // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. P. 4982; <https://doi.org/10.1002/grl.50980>
13. Fuller-Rowell T., Akmaev R., Wu F., Fedrizzi M. et al. // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. L18104; <https://doi.org/10.1029/2011GL048985>
14. Pedatella N.M. // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. № 18. P. 9383; <https://doi.org/10.1002/2016GL070592>
15. Klimenko V.V., Klimenko M.V., Bessarab F.S. et al. // Adv. Space Res. 2019. V. 64. № 10. P. 1854; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.06.029>
16. Rishbeth H., Mendillo M. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2001. V. 63. P. 1661; [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(01\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00036-0)
17. Deminov M.G., Deminova G.F., Zhrebtsov G.A. et al. // Advances in Space Research. 2011. V. 51. № 5. P. 702; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.09.037>
18. Ratovsky K.G., Medvedev A.V., Tolstikov M.V. // Adv. Space Res. 2015. V. 55. № 8. P. 2041; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.08.001>
19. Wang H., Akmaev R.A., Fang T.-W. et al. // J. Geophys. Res. Space Physics. 2014. V. 119. № 3. P. 2079; <https://doi.org/10.1002/2013JA019481>
20. Pedatella N.M., Fang T.W., Jin H. et al. // J. Geophys. Res. Space Physics. 2016. V. 121. № 7. P. 7204; <https://doi.org/10.1002/2016JA022859>
21. Liu J., Liu H., Wang W. et al. // J. Geophys. Res. 2018. V. 123. № 2. P. 1534; <https://doi.org/10.1002/2017ja025010>
22. Martynenko O.V., Fomichev V.I., Semeniuk K. et al. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2014. V. 120. P. 51; <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.08.014>
23. Jin H., Miyoshi Y., Pancheva D. et al. // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. A10323; <https://doi.org/10.1029/2012JA017650>
24. Griffith M.J., Jackson D.R., Griffin D.J. et al. // J. Space Weather Space Clim. 2020. V. 10. № 19. P. 20; <https://doi.org/10.1051/swsc/2020018>
25. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S. et al. // J. Space Weather Space Clim. 2019. V. 9. № A39; <https://doi.org/10.1051/swsc/2019037>
26. Bessarab F.S., Sukhodolov T.V., Klimenko M.V. et al. // Advances in Space Research. 2021. V. 67. № 1. P. 133; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.026>
27. Schmidt H., Brasseur G.P., Charron M. et al. // J. Climate. 2006. V. 19. № 16. P. 3903; <https://doi.org/10.1175/jcli3829.1>
28. Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Förster M. et al. // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. № A7. P. 14697; <https://doi.org/10.1029/98JA00210>
29. Клименко М.В., Клименко В.В., Брюханов В.В. // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46. № 4. С. 485.
30. Васильев П.А., Бессараб Ф.С., Карпов И.В. и др. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 2. С. 41; <https://doi.org/10.31857/S0002-351555241-50>

31. *Timchenko A.V., Bessarab F.S., Klimenko M.V. et al.* // *Curr. Probl. Remote Sensing Earth Space*. 2020. V. 17. № 6. P. 167;
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-6-167-172>
32. *Christensen A.B., Paxton L.J., Avery S. et al.* // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № A12;
<https://doi.org/10.1029/2003JA009918>
33. *Korenkov Y.N., Klimenko V.V., Klimenko M.V. et al.* // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. A10309;
<https://doi.org/10.1029/2012JA018018>
34. *Pancheva D., Mukhtarov P.* // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2011. V. 73. № 13. P. 1697;
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.03.006>
35. *Polyakova A.S., Chernigovskaya M.A., Perevalova N.P.* // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2014. V. 120. P. 15;
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.08.011>
36. *Yasyukevich A.S.* // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2018. V. 123. № 4. P. 3027;
<https://doi.org/10.1002/2017JA024739>
37. *Борчевкина О.П., Коренькова Н.А., Леценко В.С. и др.* // *Хим. физика*. 2020. Т. 39. № 10. С. 80;
<https://doi.org/10.31857/S0207401X20100039>